

Таким образом, солнечные лучи, солнечная радиация, являются для Земли единственным практически важным источником энергии (тепла).

И сам человек, существование которого обусловлено поглощением растительной и животной пищи, всем своим бытием обязан солнечным лучам.

Почти все процессы, происходящие на земле, в атмосфере и в воде, обусловлены наличием солнечной энергии.

Н. Н. Калитин (1947 г.)

Раздел II

Радиационный режим атмосферы

Глава 5. Солнечная радиация

Основные законы излучения. Солнце и солнечная постоянная. Распределение солнечной радиации по земному шару при отсутствии атмосферы

Глава 6. Ослабление солнечной радиации

Поглощение солнечной радиации в атмосфере Земли. Рассеяние солнечной радиации в атмосфере. Законы ослабления солнечной радиации в земной атмосфере. Прямая солнечная радиация. Рассеянная радиация. Суммарная радиация. Альbedo

Глава 7. Излучение Земли и атмосферы

Излучение земной поверхности. Излучение атмосферы. Полуэмпирические формулы для излучения атмосферы и эффективного излучения земной поверхности. Влияние облачности на встречное и эффективное излучение. Суточный и годовой ход эффективного излучения

Глава 8. Радиационный баланс земной поверхности и атмосферы

Радиационный баланс земной поверхности. Радиационный баланс атмосферы и системы земная поверхность—атмосфера

Глава 5 Солнечная радиация

Энергия, излучаемая Солнцем, носит название *солнечной радиации*. Поступая на Землю, солнечная радиация в большей своей части превращается в тепло.

Практически солнечная радиация является единственным источником энергии для Земли и атмосферы. По сравнению с солнечной энергией значение других источников энергии для Земли ничтожно мало. Например, температура Земли в среднем с глубиной возрастает (примерно на 1°C на каждые 35 м). Благодаря этому поверхность Земли получает некоторое количество тепла из внутренних частей. Подсчитано, что в среднем 1 см^2 земной поверхности получает из внутренних частей Земли около 220 Дж в год. Это количество в 5000 раз меньше тепла, получаемого от Солнца. Некоторое количество тепла Земля получает от звезд и планет, но и оно во много раз (приблизительно в 30 млн.) меньше тепла, поступающего от Солнца.

Количество энергии, посылаемой Солнцем на Землю, огромно. Так, мощность потока солнечной радиации, поступающей на площадь в 10 км^2 , составляет в летний безоблачный день (с учетом ослабления атмосферой) 7—9 млн. кВт. Это больше, чем мощность Красноярской ГЭС. Количество лучистой энергии, поступающей от Солнца за 1 с на площадь $15 \times 15\text{ км}$ (это меньше площади Ленинграда) в околополуденные часы летом, превышает мощность всех электростанций Советского Союза в 1970 г. (166 млн. кВт). В Средней Азии приход только прямой солнечной радиации в среднем за год превышает $4,1868 \cdot 10^{12}\text{ кДж/км}^2$. Лучистая энергия, поступающая на площадь $30 \times 30\text{ км}$ за год, достигает $3,8 \times 10^{15}\text{ кДж}$. Это больше количества энергии, выработанной в СССР в 1972 г. ($3,1 \cdot 10^{15}\text{ кДж}$). Из этого огромного количества энергии непосредственно используется человеком лишь ничтожно малая часть.

В последнее время все более настойчиво подчеркивается мысль о необходимости использования солнечной радиации в качестве основного источника энергии на Земле. Современные достижения химии дают основание допустить, что в не столь отдаленном будущем удастся разрешить проблему фотосинтеза вне растений. Если коэффициент использования солнечной энергии будет поднят до 20% (это примерно вдвое больше, чем максимальный к. п. д. фотосинтеза в растениях), то, согласно оценкам, на площади 10^7 км^2

при среднем значении потока солнечной радиации $7,1 \cdot 10^{12}$ кДж/км² в год (такие значения характерны для юга Европы и Северной Африки) можно получить количество энергии (энергетический урожай), равное $1,4 \cdot 10^{19}$ кДж в год.

В результате сжигания всех добытых на Земле в 1970 г. горючих ископаемых (уголь, нефть, газ) получено $2,3 \cdot 10^{17}$ кКж. Таким образом, использование солнечной радиации позволило бы увеличить энергетические ресурсы Земли примерно в 60 раз.

Отметим, что проблема обеспечения человечества энергией в будущем вызывает озабоченность уже сегодня: запасы горючих ископаемых на Земле неограниченны. Если допустить, что темпы роста добычи топлива (приблизительно удвоение ее за каждые 20 лет) сохранятся и в будущем, то, как показывают оценки, через 80—140 лет будут исчерпаны все запасы горючих ископаемых. Темпы добычи нефти и газа еще более высоки: они удваиваются примерно каждые 10 лет. К тому же мировые запасы нефти и газа примерно в 5 раз меньше, чем угля. Если так будет продолжаться, то эти важнейшие для транспорта и химии источники сырья будут исчерпаны еще при жизни нынешнего поколения молодых людей.

«Таким образом,— отмечает академик Н. Н. Семенов,— над человечеством нависает настоящая катастрофа — энергетический голод. Мы — люди, живущие сейчас,— бездумно расходует запасы ценнейшего сырья, которое понадобится будущим поколениям людей для обеспечения производства химических препаратов, органических материалов, моющих средств и т. п. Поэтому нашей задачей... является решение вопроса об иных, новых, более эффективных путях обеспечения человечества энергией». Такими новыми источниками энергии могут служить термоядерные реакции и Солнце. Однако получение атомной энергии ограничено залежами урана, а также возможностью перегрева земной поверхности и атмосферы в результате выделения тепла в термоядерных реакторах. Никаких ограничений не существует в отношении использования солнечной радиации, которую акад. Н. Н. Семенов считает основным источником энергии на Земле в будущем.

1 Основные понятия и законы излучения

Всякое излучение сопровождается потерями энергии излучающего тела. В метеорологии в основном рассматривается температурное, или тепловое, излучение. Энергия излучения составляет часть внутренней энергии излучающего тела. При излучении запас внутренней энергии в теле уменьшается, что приводит к понижению температуры. Но излучающее тело в свою очередь поглощает энергию, идущую к нему со стороны всех других окружающих тел.

Изменение теплового состояния тела при наличии одного лишь *лучистого* теплообмена определяется разностью между излучаемой и поглощаемой энергией. Простейшими свойствами обладает так называемое *равновесное тепловое излучение*, при котором тело излучает столько же энергии, сколько и поглощает. Тепловое состояние тела в этом случае не изменяется. В реальных условиях излучение, как правило, носит неравновесный характер. Но если изменение температуры тела происходит медленно, то законы излучения будут близки к законам равновесного излучения.

Как и для других видов энергии, единицей лучистой энергии в СИ служит джоуль (Дж). Основной количественной характеристикой поля излучения служит поток лучистой энергии.

Пусть через площадку dS поверхности тела в единицу времени излучается во все стороны количество лучистой энергии $d\Phi$. Количество энергии, излучаемой телом через единичную поверхность в единицу времени во всех направлениях (в пределах полусферы), носит название поверхностной плотности лучистого потока или энергетической светимости (при поступлении энергии от других тел — энергетической освещенности). В дальнейшем эту величину будем называть кратко — *лучистым потоком* или *потоком радиации*. Обозначив этот поток через F , запишем

$$F = d\Phi/dS. \quad (1.1)$$

Под потоком радиации будем понимать также количество энергии, которое проходит через единичную поверхность в единицу времени, хотя эта энергия поступила от других тел (не связанных с рассматриваемой поверхностью). Единицей потока радиации в системе СИ служит Дж/(м²·с) или Вт/м².

Для полной энергетической характеристики потока лучистой энергии необходимо указать распределение энергии по длинам волн. Для этого выделим в общем потоке элементарный участок в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. Количество энергии $d\Phi_\lambda$ в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$, излучаемой с поверхности dS . пропорционально dS и $d\lambda$:

$$d\Phi_\lambda = F_\lambda d\lambda dS. \quad (1.2)$$

Величина F_λ характеризует плотность распределения лучистой энергии по длинам волн вблизи данной длины волны λ . Она носит название *спектральной плотности потока радиации* или *излучательной способности* тела; ее единица — Вт/(м²·мкм). Величину F_λ часто называют также монохроматическим потоком.

Полный поток радиации F всех длин волн, очевидно, выразится интегралом

$$F = \int_0^{\infty} F_\lambda d\lambda. \quad (1.3)$$

Пусть на тело падает монохроматический поток радиации F_λ , часть которого поглощается телом (F'_λ), часть отражается (F''_λ) и часть проходит сквозь него (F'''_λ). Очевидно,

$$F'_\lambda + F''_\lambda + F'''_\lambda = F_\lambda. \quad (1.4)$$

Разделив обе части этого равенства на F_λ , получим

$$\frac{F'_\lambda}{F_\lambda} + \frac{F''_\lambda}{F_\lambda} + \frac{F'''_\lambda}{F_\lambda} = 1. \quad (1.5)$$

Первый член в левой части этого соотношения называют *поглощательной* способностью тела или относительным коэффициентом поглощения ($a_\lambda = F'_\lambda/F_\lambda$), второй — *отражательной* способностью или альбедо ($r_\lambda = F''_\lambda/F_\lambda$) и третий — относительным коэффициентом *пропускания* ($d_\lambda = F'''_\lambda/F_\lambda$). Следовательно,

$$a_\lambda + r_\lambda + d_\lambda = 1. \quad (1.6)$$

Эти величины безразмерны и изменяются от 0 до 1.

Коэффициенты поглощения, отражения и пропускания зависят в общем случае от длины волны. Оконное стекло, например, прозрачно только для видимых лучей, а для ультрафиолетовых и инфракрасных почти непрозрачно.

Это свойство тел называется *селективностью (избирательностью) поглощения (отражения, пропускания)*. Особенно резко выражены свойства селективности поглощения у газов (кислорода, водяного пара, углекислого газа, озона). Каждый газ имеет свой достаточно сложный спектр поглощения (a_λ является функцией длины волны).

Если для всех длин волн $a_\lambda = 1$, то $r_\lambda = d_\lambda = 0$; это значит, что вся падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются *абсолютно черными*.

Если $r_\lambda = 1$, то $a_\lambda = d_\lambda = 0$, т. е. вся падающая лучистая энергия отражается. При этом, если отражение правильное (т. е. подчиняется законам геометрической оптики), тела называются *зеркальными*, если же отражение диффузное — *абсолютно белыми*.

Большинство твердых тел для радиации непрозрачно, т. е. для них $d_\lambda = 0$. В таком случае

$$a_\lambda + r_\lambda = 1. \quad (1.7)$$

Из соотношения (1.7) следует, что если тело хорошо отражает лучистую энергию, то плохо ее поглощает, и наоборот. В случае непрозрачного тела из общего потока F_λ часть его, равная

$$F'_\lambda = a_\lambda F_\lambda, \quad (1.8)$$

поглощается, а другая часть,

$$F_{\lambda}'' = r_{\lambda} F_{\lambda} = (1 - a_{\lambda}) F_{\lambda}, \quad (1.9)$$

отражается.

Введенные коэффициенты a_{λ} , r_{λ} и d_{λ} характеризуют свойства поглощения, отражения и пропускания тела в целом. Наряду с ними необходимо ввести также характеристики, которые определяли бы свойства поглощения (ослабления) и пропускания в слое некоторой конечной толщины.

Пусть в слой, содержащий поглощающее радиацию вещество массой m , входит монохроматический поток $F_{\lambda}(0)$. Поток, вышедший из слоя, обозначим через $F_{\lambda}(m)$. Тогда функция поглощения (ослабления) определяется как безразмерное отношение

$$A_{\lambda}(m) = \frac{F_{\lambda}(0) - F_{\lambda}(m)}{F_{\lambda}(0)} = 1 - \frac{F_{\lambda}(m)}{F_{\lambda}(0)}; \quad (1.10)$$

функция пропускания — как отношение

$$P_{\lambda}(m) = F_{\lambda}(m)/F_{\lambda}(0). \quad (1.11)$$

Из соотношений (1.10) и (1.11) вытекает, что для функций поглощения и пропускания всегда выполняется равенство

$$A_{\lambda}(m) + P_{\lambda}(m) = 1. \quad (1.12)$$

Опыт показал, что между излучательной F_{λ} и поглощательной a_{λ} способностями тела имеется вполне определенная связь. Отношение излучательной способности к поглощательной в условиях термодинамического равновесия не зависит от природы тела: оно является для всех тел одной и той же функцией $B(\lambda, T)$ длины волны λ и температуры T (закон Кирхгофа):

$$\frac{F_{\lambda}}{a_{\lambda}} = B(\lambda, T). \quad (1.13)$$

Для черного тела $a_{\lambda} = 1$. Излучательная способность такого тела, согласно (1.13), равна $B(\lambda, T)$, т. е.

$$(F_{\lambda})_{\text{ч.т.}} = B(\lambda, T). \quad (1.14)$$

Таким образом, функция $B(\lambda, T)$ в законе Кирхгофа представляет собой излучательную способность абсолютно черного тела.

В природе абсолютно черных тел не существует. Для всех реальных тел $a_{\lambda} < 1$. Согласно закону Кирхгофа, это означает, что все реальные тела излучают энергии меньше, чем абсолютно черное тело (при той же температуре).

Как указывалось, многие тела, особенно газы, обладают селективным поглощением. Поэтому в согласии с законом Кирхгофа

они и излучают энергию лишь вполне определенных длин волн, а энергия тех длин волн, которая не поглощается, телами и не излучается.

Аналитический вид функции $B(\lambda, T)$ был установлен в 1900 г. немецким физиком М. Планком. Исходя из представлений о квантовом характере процесса излучения, он для излучательной способности абсолютно черного тела (в полусфере) нашел функцию следующего вида:

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (1.15)$$

где $c_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $c_2 = 1,438\,786 \cdot 10^{-2}$ м·К — первая и вторая постоянная излучения, T — абсолютная температура тела (в кельвинах).

Графически распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела по длинам волн при разных температурах представлено на рис. 5.1. Каждая кривая, соответствующая определенной температуре, имеет максимум, который при возрастании температуры смещается в сторону более коротких волн и становится более острым. Длина волны λ_m , на которую приходится максимум излучательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна температуре T (закон смещения длины волны, или закон Вина):

$$\lambda_m = c'/T, \quad (1.16)$$

где $c' = 0,289\,76 \cdot 10^{-2}$ м·К — постоянная.

При низких температурах максимум излучательной способности лежит в области более длинных волн и тело испускает преимущественно невидимые (инфракрасные) лучи. В этом случае доля энергии, приходящаяся на видимые лучи, так мала, что излучение практически не воспринимается глазом.

Около 99 % энергии, излучаемой черным телом при температуре земной поверхности ($T \approx 288$ К), приходится на интервал длин волн 3—80 мкм с максимумом излучения при $\lambda_m \approx 10$ мкм. Максимум излучения Солнца приходится на длину волны $\lambda_m = 0,4738$ мкм (синий цвет).

Излучательная способность черного тела быстро возрастает с температурой (см. рис. 5.1). При этом кривая излучательной способности, соответствующая более низкой температуре, располагается под кривой, соответствующей более высокой температуре.

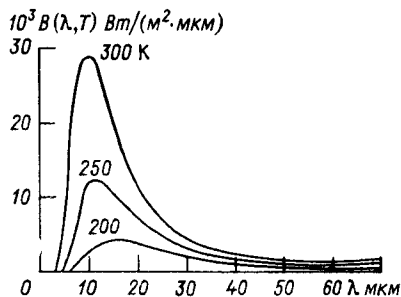


Рис. 5.1. Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела (кривая Планка).

Это значит, что для всех длин волн выполняется неравенство $B(\lambda, T_2) > B(\lambda, T_1)$, если $T_2 > T_1$.

Полный поток излучения абсолютно черного тела находится с помощью интеграла

$$B = \int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda.$$

Подставив $B(\lambda, T)$ по (1.15) и выполнив интегрирование, найдем

$$B = \sigma T^4, \quad (1.17)$$

где $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана.

Согласно формуле (1.17), поток излучения B абсолютно черного тела возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела. Закон (1.17) до открытия Планка был установлен экспериментально Стефаном и теоретически Больцманом.

Второй закон Вина устанавливает, что максимальная излучательная способность абсолютно черного тела $B(\lambda_m, T)$ возрастает пропорционально пятой степени абсолютной температуры:

$$B(\lambda_m, T) = c'' T^5, \quad (1.18)$$

где $c'' = 1,301 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵).

Соотношения (1.13), (1.15), (1.16) и (1.17) выражают основные законы температурного излучения.

Наряду с понятием абсолютно черного тела вводится понятие *серого тела*. Серым телом называют такое тело, поглощательная способность a_λ которого для всех длин волн одинакова: $a_\lambda = a = \text{const}$. Таким образом, излучательная способность серого тела при всех длинах волн составляет одну и ту же часть от излучательной способности абсолютно черного тела, а поток излучения серого тела $F = aB$.

Показатели ослабления. Наряду с функцией ослабления радиации $A_\lambda(m)$, которая характеризует потерю энергии в слое конечной толщины (массы), вводятся и широко используются понятия *показателей ослабления, поглощения и рассеяния*. Если лучистый поток F_λ в некотором слое атмосферы сместился на малое расстояние dl , то, согласно известному закону Бугера, ослабление потока dF_λ пропорционально плотности среды ρ , пройденному расстоянию dl и значению самого потока F_λ в момент входа его в элементарный слой:

$$dF_\lambda = -\alpha_\lambda F_\lambda \rho dl. \quad (1.19)$$

Введенный этим уравнением множитель пропорциональности α_λ носит название *массового показателя ослабления* (соответст-

венно — поглощения или рассеяния, если ослабление обусловлено только поглощением или рассеянием радиации); его единица — $\text{м}^2/\text{кг}$.

Физический смысл α_λ легко устанавливается непосредственно из уравнения (1.19). Если в нем массу элементарного столба (с поперечным сечением 1 м^2) положить равной единице ($\rho dl = 1 \text{ кг}/\text{м}^2$), то получим

$$\alpha_\lambda = -dF_\lambda/F_\lambda.$$

Таким образом, массовый показатель ослабления равен относительной величине ослабления потока радиации в столбе воздуха (или любой другой среды) единичной массы. Поскольку поглощение и рассеяние зависят от длины волны, то и α_λ — функция λ .

Широко распространено также понятие *объемного (или линейного) показателя ослабления*

$$k_\lambda = \alpha_\lambda \rho; \quad (1.20)$$

единица k_λ — м^{-1} (обратный метр).

Смысл k_λ легко выясняется, если уравнение (1.19) переписать в виде

$$dF_\lambda = -k_\lambda F_\lambda dl. \quad (1.21)$$

и положить в нем $dl = 1 \text{ м}$. Тогда $k_\lambda = -dF_\lambda/F_\lambda$, т. е. объемный (линейный) показатель ослабления численно равен относительной величине ослабления потока радиации при прохождении лучами единичного расстояния. Поскольку основание объема 1 м^2 , то можно сказать и по-другому: k_λ — это относительная величина ослабления потока в единичном объеме воздуха. Отсюда и два названия k_λ .

Из соотношения (1.20) следует, что объемный показатель ослабления — функция не только состава среды (от которой зависит α_λ), но и плотности среды. Вследствие этого значения k_λ рассчитываются при определенном значении плотности (для воздуха чаще всего при нормальных условиях — давлении 1013 гПа и температуре 0°C). Отметим, что использовать k_λ целесообразно при изучении распространения лучей в горизонтальном направлении (в котором плотность изменяется сравнительно мало).

При определении показателей поглощения радиации каким-либо газом (водяным паром, углекислым газом, озоном и др.) в уравнении (1.19) и соотношении (1.20) плотность воздуха (ρ) заменяется на плотность поглощающего газа ρ_w , при этом k_λ рассчитывается при значении ρ_w , соответствующем нормальным условиям.

Иногда встречаются понятия так называемых десятичных показателей ослабления (α'_λ и k'_λ), которые связаны с α_λ и k_λ простыми соотношениями: $\alpha'_\lambda = 0,434\alpha_\lambda$, $k'_\lambda = 0,434k_\lambda$ (здесь $0,434\dots$ — мо-

доль перехода от натуральных логарифмов к десятичным: $e^{-\alpha\lambda} = 10^{-\alpha\lambda}$.

Энергетическая яркость. Наряду с потоком (F) и спектральной плотностью потока (F_λ) радиации вводится понятие *энергетической яркости*. Через элементарную площадку dS в общем случае проходят лучи всевозможных направлений. Рассмотрим только те из этих лучей, которые группируются вокруг определенного направления R , составляющего с нормалью (n) к площадке dS угол ϑ (рис. 5.2). Тогда количество лучистой энергии $d\Phi_\lambda^{(R)}$, за-

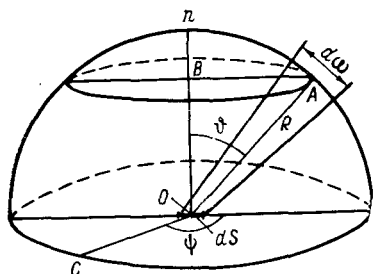


Рис. 5.2. К введению понятия энергетической яркости.

ключенной в спектральном интервале $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ и проходящей за единицу времени через площадку dS в направлении R , запишем в виде

$$d\Phi_\lambda^{(R)} = G_\lambda \cos \vartheta dS d\lambda d\omega, \quad (1.22)$$

где $d\omega$ — телесный угол конуса вокруг направления R . Введенная этим соотношением величина G_λ , зависящая в общем случае от направления распространения лучей (R), и носит название *энергетической яркости*. Нетрудно видеть, что произведение $\cos \vartheta dS = dS_n$ представляет собой площадь проекции dS на поверхность, перпендикулярную к направлению лучей R . Таким образом, энергетическая яркость — это количество лучистой энергии, которое проходит за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную лучам ($dS_n = \cos \vartheta dS = 1 \text{ м}^2$), и заключено в единичном интервале длин волн ($d\lambda = 1 \text{ мкм}$) и единичном телесном угле ($d\omega = 1 \text{ ср}$). Единица G_λ — $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{ср})$, а практической единицей G_λ чаще служит $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$.

Элемент телесного угла $d\omega$ в сферических координатах (R , ϑ , ψ) записывается в виде

$$d\omega = \frac{R \sin \vartheta d\vartheta \cdot R d\psi}{R^2} = \sin \vartheta d\vartheta d\psi, \quad (1.23)$$

где ψ — азимут, R — расстояние точки на сфере от начала координат; за ось z , от которой отсчитываются углы ϑ , принята нормаль n .

Для количества лучистой энергии $d\Phi_\lambda$, проходящей за единицу времени через dS по всем направлениям R в пределах полушара, справедливо, очевидно, выражение

$$d\Phi_\lambda = \int_{(R)} d\Phi_\lambda^{(R)}$$

или, с учетом (1.22) и (1.23)

$$d\Phi_\lambda = \left[\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} G_\lambda(\vartheta, \psi) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \right] d\lambda dS. \quad (1.24)$$

Сопоставляя соотношения (1.2) и (1.24) получаем формулу, связывающую спектральную плотность потока F_λ (монохроматический поток) с энергетической яркостью G_λ :

$$F_\lambda = \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} G_\lambda(\vartheta, \psi) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta. \quad (1.25)$$

Если G_λ не зависит от направления, то поле излучения называется *изотропным*. В этом случае $G_\lambda = G_\lambda(x, y, z, t)$ — функция лишь координат точки x, y, z и времени t , а между F_λ и G_λ существует наиболее простая связь

$$F_\lambda = \pi G_\lambda, \quad (1.26)$$

поскольку

$$\int_0^{\pi/2} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \sin^2 \vartheta/2 \Big|_0^{\pi/2} = 1/2.$$

2 Солнце и солнечная постоянная

Солнце можно разделить на *внутреннюю часть* и *атмосферу*.

Внутренняя часть имеет температуру свыше 5 млн. кельвинов. Здесь возникают термоядерные реакции перехода водорода в гелий. Энергия этих реакций распространяется из недр Солнца путем поглощения и переизлучения световых квантов вышележащими слоями. В верхнем слое (толщиной около 100 000 км) этой части, называемом конвективной зоной, перенос энергии осуществляется также путем конвекции (скорость подъема горячих масс газа и опускания холодных масс — 1—2 км/с).

Атмосфера Солнца состоит из трех слоев. Самый нижний слой толщиной 100—300 км носит название *фотосферы*. Она представляет собой сильно ионизованный газ с температурой 5000—6000 К и давлением на верхней границе около 100 гПа. Фотосфера излучает практически всю энергию, поступающую на Землю от Солнца. Выше фотосферы расположена *хромосфера*, простирающаяся до высоты 10 000—15 000 км, и *солнечная корона*, представляющая собой почти полностью ионизованный газ — плазму (с числом частиц в 1 см³ около $3 \cdot 10^7$ у основания короны и около 200 вблизи орбиты Земли).